

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ $\text{Fe}^{2+}$ ПО ПОЗИЦИЯМ M1 И M2 В СИЛИКАТНЫХ ФАЗАХ КАМЕННЫХ И ЖЕЛЕЗОКАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ: ОЦЕНКА МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ И МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Макимова А.А., Чукин А.В., Петрова Е.В., Оштрах М.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,  
oshtrakh@gmail.com

Каменные и железокатенные метеориты содержат различные железосодержащие минералы, среди которых существенную долю составляют силикатные фазы. Такие минералы, как оливин  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ , ортопироксен  $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3$  и клинопироксен  $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_3$  входят в состав обыкновенных хондритов (каменные метеориты), в то время как оливин является составной частью палласитов (железокатенные метеориты). Кристаллы силикатов интересны тем, что в них имеются две кристаллографически неэквивалентные позиции для ионов металлов ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , а в случае клинопироксена еще и  $\text{Ca}^{2+}$ ): M1 и M2. Известно, что заселенность этих позиций ионами  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  отличается в разных силикатах. Так, например, в оливине доля ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в позициях M1 несколько больше, чем в M2, а в ортопироксене ионы  $\text{Fe}^{2+}$  преимущественно занимают позиции M2. Это связано с небольшими структурными отличиями и разной степенью искажения локального окружения позиций иона металла, что приводит к энергетически более выгодному распределению ионов металлов с различающимися ионными радиусами. В высококальциевых клинопироксенах ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,

имеющие больший ионный радиус занимают более искаженные позиции M2, вытесняя из них ионы  $\text{Fe}^{2+}$ , что приводит к увеличению доли этих ионов в позициях M1, в отличие от низкокальциевого клинопироксена или ортопироксена. Особый интерес к распределению ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в силикатных кристаллах, причем не только внеземной природы, связан с тем, что при отсутствии повторного нагрева и ударных нагрузок по распределению ионов металла можно оценить температуру равновесного катионного упорядочения, т.е. получить информацию о термической предыстории силикатных минералов. Поэтому представляет интерес использование различных методов для оценки распределения ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  по позициям M1 и M2 в силикатных кристаллах. В настоящей работе представлен подход к оценке распределения ионов  $\text{Fe}^{2+}$  по позициям M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене в образцах ряда обыкновенных хондритов и в одном образце палласита основной группы (PMG) по данным рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением.

Таблица 1. Оценки соотношения заселенностей позиций M1 и M2 ионами  $\text{Fe}^{2+}$  в силикатах

Силикатные фазы	Метод оценки	
	Рентгеновская дифракция $X_{\text{Fe}}^{\text{M1}}/X_{\text{Fe}}^{\text{M2}}$	Мессбауэровская спектроскопия $A^{\text{M1}}/A^{\text{M2}}$
<b>Оливин</b>		
Челябинск LL5 № 2	1.17	1.18
NWA 6286 LL6	1.23	1.19
NWA 7857 LL6	1.16	1.22
Аннама H5	1.2	1.4
Сеймчан PMG	1.38	1.31
<b>Ортопироксен</b>		
Челябинск LL5 № 2	0.20	0.25
NWA 6286 LL6	0.25	0.26
NWA 7857 LL6	0.33	0.34
Аннама H5	0.1	0.2
<b>Клинопироксен</b>		
Челябинск LL5 № 2	1.78	1.90
NWA 6286 LL6	1.33	1.30
NWA 7857 LL6	2.00	2.43
Сеймчан PMG	1.6	1.67

Были исследованы образцы обыкновенных хондритов Челябинск LL5, Northwest Africa (NWA) 6286 LL6 и 7857 LL6, Аннама H5 и образец палласита Сеймчан PMG. Размельченные образцы обыкновенных хондритов и каменной части палласита исследовались методами рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии. В результате анализа измеренных рентгенограмм по методу Ритвельда были выявлены не только имеющиеся фазы в образцах, но и получены оценки заселенностей позиций M1 и M2 в силикатах ионами  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  ( $X_{\text{Fe}}^{\text{M1}}$  и  $X_{\text{Fe}}^{\text{M2}}$ ;  $X_{\text{Mg}}^{\text{M1}}$  и  $X_{\text{Mg}}^{\text{M2}}$ , соответственно). Наилучшая аппроксимация мессбауэровских спектров, измеренных с высоким скоростным разрешением, позволила выявить основные и минорные компоненты в спектрах, связанные с различными железосодержащими фазами, а также выявить компоненты спектров, связанные с ядрами  $^{57}\text{Fe}$

в позициях M1 и M2 в различных силикатах, и оценить их относительную площадь ( $A^{\text{M1}}$  и  $A^{\text{M2}}$ ). Поскольку относительная площадь компоненты в мессбауэровском спектре в грубом приближении пропорциональна доле ядер  $^{57}\text{Fe}$  в данном соединении, то по соотношению относительных площадей (за вычетом вклада других компонент) можно оценить относительную долю ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в позициях M1 и M2 в разных силикатах. Сопоставление оценок заселенностей позиций M1 и M2 ионами  $\text{Fe}^{2+}$ , полученных методами рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии показало, что они достаточно близки (Табл. 1), что позволяет сделать вывод о корректности данного подхода и проведенных измерений. Это позволило также оценить температуры равновесного катионного упорядочения для некоторых оливинов и пироксенов на основе данных двух независимых методов.